

УДК 539.5:622.24

МЕТОД РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

¹В.М. Вакалюк, ²Ю.М. Лях, ¹Я.В. Солоничний, ¹А.В. Вакалюк¹ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727101,
e-mail: po@nirg.edu.ua²ТОВ «Юг-Нефтегаз»; 68001, м. Київ, вул. Раскової Марини, 23

Високопродуктивний буровий інструмент виготовляють із конструкційних матеріалів, яким притаманна велика твердість та значна пластичність. Такі властивості мають двофазні композиційні матеріали, які отримують при застосуванні обертових ливарних форм. В струмину розплавленого металу засипають твердосплавні гранули. Завдяки відцентровим силам вони переміщуються в розплавленій металевій матриці до зовнішньої робочої поверхні деталі. Під час її охолодження від температури кристалізації металу до кімнатної температури в об'ємі отриманого виробу виникає напружений стан внаслідок різниці термічних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів в'язкої матриці та гранул армітора із значною твердістю. Зменшення напруг в матриці і гранулі можна досягти покриттям гранул плакуючим шаром. В даній роботі розроблений метод розрахунку механічних напружень системи "металозв'язка – плакуючий шар – сферична гранула армітора".

Ключові слова: напружений стан, породоруйнуючий інструмент, композиційний матеріал, гранула, металічна матриця, плакуючий шар.

Високопроизводительный буровой инструмент изготавливают из конструкционных материалов, обладающих большой твердостью и значительной пластичностью. Такие свойства имеют двухфазные композиционные материалы, получаемые при применении вращающихся литейных форм. В струю расплавленного металла засыпают твердосплавные гранулы. Благодаря центробежным силам они перемещаются в расплавленной металлической матрице к внешней рабочей поверхности детали. При ее охлаждении от температуры кристаллизации металла до комнатной в объеме полученного изделия возникает напряженное состояние в результате разницы термических коэффициентов линейного расширения материалов вязкой матрицы и гранул арматора со значительной твердостью. Уменьшение напряжений в матрице и грануле можно достичь покрытием гранул плакирующим слоем. В данной работе разработан метод расчета механических напряжений системы "металлосвязь – плакирующий слой – сферическая гранула арматора".

Ключевые слова: напряженное состояние, породоразрушающий инструмент, композиционный материал, гранула, металлическая матрица, плакирующий слой.

High productive drilling tool is made of structural materials, which are characterized by hardness and high ductility. These properties also belong to the two-phase composite materials, which are obtained by using pivoting moulds. Hard-alloy granules are poured into a molten metal stream. Due to centrifugal forces, they move into the molten metal matrix to the outer working surface of the materials. When it is cooled from the metal crystallization temperature to the room temperature, the stress state emerges in the volume of an obtained material, which is due to the difference of thermal linear expansion coefficients of materials of viscous matrix and armitor granules with considerable firmness. Stress reduction in matrix and granules can be obtained by covering the granules with a cladding layer. This paper deals with the development of the method for calculating the mechanical stresses of the "metal-on-metal connection – cladding layer – spherical armitora granule" system.

Keywords: stress state, drilling tools, composite material, metal matrix, granule, cladding layer.

Вступ. Під час буріння свердловин породоруйнуючий інструмент повинен поєднувати в собі високу твердість, що забезпечить достатню зносостійкість в абразивному середовищі, з пластичністю, яка буде запобігати появі тріщин і руйнуванню складових частин інструменту при ударах і великих змінних навантаженнях [1]. Однофазних конструкційних матеріалів з поєднанням таких властивостей практично не існує. Якщо матеріал достатньо твердий, то він, як правило, є крихкий. Пластичні ж матеріали є досить м'якими. Тому для високопродуктивного бурового інструменту вигідно використовувати двофазні композиційні матеріали, компоненти якого мають вищезгадані експлуатаційні характеристики. Суть одного із таких методів отримання робочих частин бурового інструме-

нту із композиційного матеріалу полягає в наступному. Ливарну форму обертають із необхідною кутовою швидкістю відносно її осі симетрії. При цьому в струмину розплавленого металу, який заливають в обертову ливарну форму, засипають твердосплавні гранули. Оскільки їх густина значно більша від густини металу, то завдяки відцентровим силам твердосплавні гранули переміщуються в розплавленій металевій матриці ближче до зовнішньої поверхні деталі. При її охолодженні від температур кристалізації металу до кімнатних температур в об'ємі отриманого виробу виникає напружений стан через різницю термічних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів матриці та твердосплавних гранул.

Постановка проблеми. Дослідження в роботі [2] напруженого стану композиційних матеріалів, отриманих згаданим вище технологічним методом, показали, що для існуючих промислових марок сталі і в металозв'язці, і в гранулі можуть виникати значні напруження. Зменшити величину цих напружень можна завдяки покриттю гранул плакуючим (захисним) шаром із відповідними коефіцієнтами термічного лінійного розширення та Пуассона і модулем Юнга. В даній роботі запропоновано метод розрахунку механічних напруг системи “металозв'язка – плакуючий шар – сферична гранула армітора”.

Виклад основного матеріалу. Для проведення теоретичного аналізу напруженого стану в композиційних матеріалах слід прийняти припущення, які не порушують адекватності математичної моделі процесу виникнення напружень:

а) твердосплавні гранули мають форму куляко заданого радіуса;

б) відстані між сусідніми гранулами великі в порівнянні з їхніми розмірами;

в) за будь-якої температури радіуси сферичних порожнин в матеріалі матриці відповідають радіусам гранул, покритих захисним шаром або вільних від нього, тобто існує ідеальна адгезія між межуючими поверхнями компонентів композиційного оснащення;

г) плакування твердосплавних гранул відбувається за температури кристалізації матеріалу металозв'язки;

д) модулі Юнга, коефіцієнти Пуассона і термічні коефіцієнти лінійного розширення не залежать від температури в широкому діапазоні.

Прийняті припущення є повністю реальними і практично не спотворюють умов виникнення напруженого стану в армованій зоні.

Відомо [3,4], що нормальне σ_n і тангенціальне σ_τ напруження в сферичних оболонках описуються співвідношеннями:

$$\sigma_n = \frac{p_1 r_1^3 - p_2 r_2^3}{r_2^3 - r_1^3} + (p_1 - p_2) \frac{r_1^3 r_2^3}{r^3 (r_2^3 - r_1^3)}, \quad (1)$$

$$\sigma_\tau = \frac{p_1 r_1^3 - p_2 r_2^3}{r_1^3 - r_2^3} + (p_1 - p_2) \frac{r_1^3 r_2^3}{2r^3 (r_2^3 - r_1^3)}, \quad (2)$$

де r_1 – внутрішній радіус;

r_2 – зовнішній радіус;

p_1 – внутрішній тиск;

p_2 – зовнішній тиск.

Напруження в суцільній кулі можна визначити із співвідношень (1) і (2) за умови $r_1 = 0$:

$$\sigma_n = \sigma_\tau = -p_2. \quad (3)$$

Вираз для напружень в сферичній порожнині можна отримати із співвідношень (1) і (2) за умови $r_2 \gg r_1$; $p_2 = 0$; $r \gg r_1$:

$$\sigma_n = -p_1 \frac{r_1^3}{r^3}, \quad (4)$$

$$\sigma_\tau = p_1 \frac{r_1^3}{2r^3}, \quad (5)$$

де r – відстань від центра гранули до вибраної (заданої) точки.

Для досить тонкої оболонки товщиною

$$h = r_2 - r_1 \ll r = \frac{r_1 + r_2}{2},$$

середнє значення напружень отримується при аналізі співвідношень (1) і (2), якщо знехтувати доданками з величинами, що вищі першого порядку малості:

$$\langle \sigma_n \rangle = -\frac{p_1 + p_2}{2}, \quad (6)$$

$$\langle \sigma_\tau \rangle = \frac{(p_1 - p_2)r}{2h}. \quad (7)$$

В роботі [2] отримано вирази для обчислення тангенціальних і нормальних напружень у компонентах композиційного матеріалу, отриманого при об'ємному армуванні металічної матриці твердосплавними сферичними гранулами без захисного шару. Напружений стан композиційного матеріалу, отриманого при об'ємному армуванні металічної матриці твердосплавними сферичними гранулами, покритими захисним (плакуючим) шаром, можливо проаналізувати за допомогою рис. 1, на якому зображена гранула радіусом r_1 , з товщиною захисного шару h , що міститься в сферичній порожнині металозв'язки радіусом $r_2 = r_1 + h$.

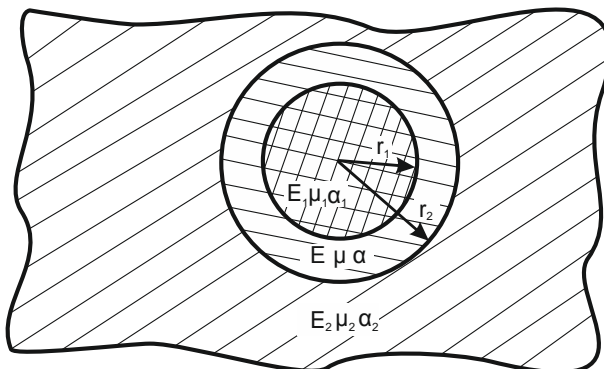


Рисунок 1 – Гранула армітора з плакуючим шаром в металевій матриці

В кулеподібних тілах деформація при всесторонньому стисканні або розтягу спрямована в усіх напрямках вздовж радіуса і є тільки функцією радіуса [3]. Згідно з узагальненим законом Гука [3,4] відносна деформація гранули при охолодженні композиційного матеріалу від температури кристалізації металозв'язки до кімнатної на ΔT отримується виразом:

$$\frac{\Delta r_1}{r_1} = \frac{2\mu_1 - 1}{E_1} p_1 + \alpha_1 \Delta T, \quad (8)$$

де E_1 , μ_1 , α_1 – модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона і термічний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу гранули відповідно;

p_1 – встановлений тиск на межі розділу гранули і захисного шару.

При цьому відносна деформація захисного шару в області, яка межує з гранулою, становить:

$$\frac{\Delta r_1'}{r_1} = \frac{1}{E} \left[\frac{\mu(3p_2r_2^3 - 2p_1r_1^3 - p_1r_2^3)}{r_2^3 - r_1^3} - p_1 \right] - \alpha \Delta T, \quad (9)$$

де E, μ, α – модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона і термічний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу захисного шару відповідно;

p_1 – встановлений тиск на межі захисного шару і гранули.

Зіставивши вирази (8) і (9) з врахуванням того, що $\Delta r_1' = -\Delta r_1$, отримуємо вираз:

$$\frac{2\mu_1 - 1}{E_1} p_1 - \frac{p_1}{E} + \frac{\mu(3p_2r_2^3 - 2p_1r_1^3 - p_1r_2^3)}{E(r_2^3 - r_1^3)} = (\alpha - \alpha_1) \Delta T. \quad (10)$$

Відносна деформація захисного шару в області, яка межує з металозв'язкою становить:

$$\frac{\Delta r_2}{r_2} = \frac{1}{E} \left[\frac{\mu(p_2r_1^3 + 2p_2r_2^3 - 3p_1r_1^3)}{r_2^3 - r_1^3} - p_2 \right] + \alpha \Delta T. \quad (11)$$

Відносна деформація металозв'язки в цій же області рівна:

$$\frac{\Delta r_2'}{r_2} = -\frac{\mu_2 + 1}{E_2} p_2 - \alpha_2 \Delta T, \quad (12)$$

де E_2, μ_2, α_2 , – модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона і термічний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу металозв'язки відповідно;

p_2 – встановлений тиск на межі захисного шару і металозв'язки.

Із порівняння співвідношень (11) і (12) з урахуванням того, що $\Delta r_2' = -\Delta r_2$, отримуємо:

$$\frac{\mu(p_2r_1^3 + 2p_2r_2^3 - 3p_1r_1^3)}{E(r_2^3 - r_1^3)} - \frac{p_2}{E} - \frac{(\mu_2 + 1)p_2}{E_2} = \Delta T(\alpha_2 - \alpha). \quad (13)$$

Використовуючи прості алгебраїчні перетворення виразів (10) і (13), можна отримати систему лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} a_1p_1 + b_1p_2 = c_1 \\ a_2p_1 + b_2p_2 = c_2 \end{cases}, \quad (14)$$

із якої знайдемо вирази для обчислення межових тисків

$$p_1 = \frac{b_2c_1 - b_1c_2}{a_1b_2 - a_2b_1} \quad \text{і} \quad p_2 = \frac{a_2c_1 - a_1c_2}{a_2b_1 - a_1b_2}, \quad (15)$$

де

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{2\mu_1 - 1}{E_1} - \frac{1}{E} - \frac{\mu(2r_1^3 + r_2^3)}{E(r_2^3 - r_1^3)}; & b_1 &= \frac{3\mu r_2^3}{E(r_2^3 - r_1^3)}; \\ c_1 &= \Delta T(\alpha - \alpha_1); \\ a_2 &= -\frac{3\mu r_1^3}{E(r_2^3 - r_1^3)}; & b_2 &= \frac{\mu(r_1^3 + 2r_2^3)}{E(r_2^3 - r_1^3)} - \frac{1}{E} - \frac{\mu_2 + 1}{E_2}; \\ c_2 &= \Delta T(\alpha_2 - \alpha). \end{aligned}$$

Підстановка знайдених із (15) значень тисків p_1 і p_2 у співвідношення (3) – (7) дає змогу оцінити напруги в твердосплавній гранулі, захисному шарі і металозв'язці.

Таким чином, нормальне і тангенціальне напруження в гранулі буде рівне:

$$\sigma_n = \sigma_\tau = -p_1. \quad (16)$$

Середні значення нормального і тангенціального напружень в плакуючому шарі обчислюються за формулами:

$$\langle \sigma_n \rangle = -\frac{p_1 + p_2}{2}, \quad (17)$$

$$\langle \sigma_\tau \rangle = \frac{(p_2 - p_1)r_3}{2h}, \quad (18)$$

де $r_3 = \frac{r_1 + r_2}{2}$,

$h = r_2 - r_1$ – товщина захисного шару.

Значення нормального і тангенціального напружень в металозв'язці обчислюються за формулами:

$$\sigma_n = -p_2 \frac{r_2^3}{r_3^3}, \quad (19)$$

$$\sigma_\tau = p_1 \frac{r_1^3}{2r_3^3}. \quad (20)$$

За відсутності захисного шару згідно з [1] тиск на межі гранули і металозв'язки обчислюється за формулою:

$$p = \frac{E_1 E_2 \Delta T (\alpha_2 - \alpha_1)}{E_2 (2\mu_1 - 1) - E_1 (\mu_2 + 1)}, \quad (21)$$

а напруження в гранулі

$$\sigma_n = \sigma_\tau = -[p], \quad (22)$$

та металозв'язці

$$\sigma_n = -[p] \frac{r_1^3}{r_3^3}, \quad (23)$$

$$\sigma_\tau = [p] \frac{r_1^3}{2r_3^3}. \quad (24)$$

Користуючись таблицями фізичних величин [5] і проводячи розрахунки за формулами (15) і (21), можна підібрати для заданих матеріалів, із яких виготовлені гранули і металозв'язка, такий матеріал захисного шару і його товщину h , щоб тиски p_1 і p_2 на межах захисного шару із гранулою і металозв'язкою були набагато меншими від тиску p на межі металозв'язки і гранули без захисного шару. Із аналізу виразів (16) – (24) випливає, що чим менші значення межових тисків, тим менші напруження в гранулах та металозв'язці. Таким чином, наявність захисного шару в гранулі призведе до зменшення радіальних і тангенціальних напружень в гранулах і металозв'язці.

Наприклад, для металозв'язки, виготовленої зі сталі марки 70Х5Г9ФТМ ($E_2 = 20 \cdot 10^{10}$ Па; $\mu_2 = 0,25$; $\alpha_2 = 15 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) і гранули, виготовленої із сплаву ТН-20 ($E_1 = 40 \cdot 10^{10}$ Па; $\mu_1 = 0,205$; $\alpha_1 = 7,1 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) радіусом $r_1 = 1$ мм, покритої шаром нікелю ($E = 20,2 \cdot 10^{10}$ Па; $\mu = 0,3$; $\alpha = 18 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) товщиною $h = 0,1$ мм, при зміні температури $\Delta T = -1400 \text{ К}$ даного композиційного матеріалу, яка рівна різниці кінцевої температури композиційного матеріалу (температури навколишнього середовища) і початкової температури (температури кристалізації даної сталі), тиски на межі захисного шару з гранулою та металозв'язкою відповідно рівні $p_1 = 0,91 \cdot 10^9$ Па. Ці значення тисків значно менші від тиску $p = 1,4 \cdot 10^9$ Па на межі металозв'язки і гранули

без захисного шару. Отже і напруження в металозв'язці і гранулі будуть меншими за наявності плакуючого шару.

Висновки

Запропонований метод розрахунку механічних напружень системи «металозв'язка – плакуючий шар – сферична гранула армітора» дає можливість завчасно визначати величину напружень, що дасть можливість оптимізувати процес виготовлення композиційних матеріалів та забезпечити раціональну їх експлуатацію.

Даний метод розрахунку напруженого стану композиційних матеріалів також можна використовувати при розробці і виготовленні клинових захоплювачів бурових роторів та захоплювачів ключів для згвинчування – розгвинчування і розкріплення різьбових з'єднань труб нафтового сортаменту.

Література

- 1 Бугай Ю.Н. Центробежно-армированный породоразрушающий буровой инструмент. Ю.Н. Бугай, И.В. Воробьев. – Львов: Высшая школа, И-во при Львовском у-те, 1989. – 208 с.
- 2 Солоничний Я. В. Напружено-деформований стан композиційних матеріалів / Я. В. Солоничний, В. М. Вакалюк, Ю. М. Лях, Д. Ю. Журавльов // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2011. – №2(28). – С. 28-30.
- 3 Писаренко Г.С. Опір матеріалів / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський. – К.: Вища школа, 2004. – 655 с.
- 4 Посацький С.Л. Опір матеріалів / С.Л. Посацький. – Львів, 1983. – 403 с.
- 5 Кикоин И.К. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К.Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
- 6 Пітулей Л.Д. Технологічне забезпечення віброармування зубків бурового інструменту: дис. канд. техн. наук: спец.05.02.08 «Технологія машинобудування» / Лоліта Дмитрівна Пітулей. – Івано-Франківськ, 2008. – 237 с.
- 7 Сорокин Г.М. Виды износа при ударном контактировании поверхностей / Г.М. Сорокин // Машиностроение. – 1974. – № 3. – С. 89-94.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
01.12.16*

*Рекомендована до друку
професором Чудиком І.І.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук Тарабаріновим П.В.
(НДПІ ПАТ «Укрнафта», м. Івано-Франківськ)*